J. JEZEQUEL
Ingénieur
Laboratoire Régional de Saint-Brieuc

les pénétromètres statiques

influence du mode d'emploi sur la résistance de pointe

L'ESSAI au pénétromètre statique peut sembler, à première vue, être totalement indépendant du mode d'emploi. Alors que, par exemple, les essais de laboratoire sur échantillons intacts sont tributaires de toute une série de manipulations, l'essai au pénétromètre statique peut séduire par son aspect purement mécanique :

par un procédé quelconque, on descend dans le sol vierge une pointe dont on enregistre, par une méthode appropriée, la résistance à l'enfoncement.

Néanmoins, il paraissait intéressant d'évaluer l'influence de certains paramètres sur la mesure de la résistance de pointe, étant donné les divergences des conclusions auxquelles aboutissaient différents expérimentateurs (voir bibliographie). Aussi notre propos n'est pas d'apprécier tel ou tel appareil, mais d'essayer de montrer la difficulté de l'exploitation immédiate et précise d'un essai dont la mise en œuvre est apparemment simple.

La base de l'étude consiste à comparer le pénétromètre Gouda classique à l'appareil modifié — le pénétromètre électrique — qui est décrit dans la rubrique « Informations » de ce bulletin *.

Nous supposerons que les paramètres secondaires qui peuvent intervenir sont parfaitement maîtrisés ; c'est-à-dire, par exemple, que les manomètres ou les pesons sont correctement étalonnés, qu'il n'existe pas dans le pénétromètre Gouda classique de frottements parasites ni de flambage des tiges dans les tubes, etc.

PRINCIPES DES MESURES

Pénétromètre Gouda *(fig. 1 et 2)*

La pointe est poussée seule sur une longueur h_1 (généralement de 4 cm) par l'intermédiaire de tiges rigides qui coulissent, sans frottement, dans un tube de revêtement.

* « Pénétromètre électrique à mesure continue » par MM. Jézéquel, Pinel et Ravilly, p. 17.

Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch. nº 36 - Janv.-Fév. 1969 - Réf. 522

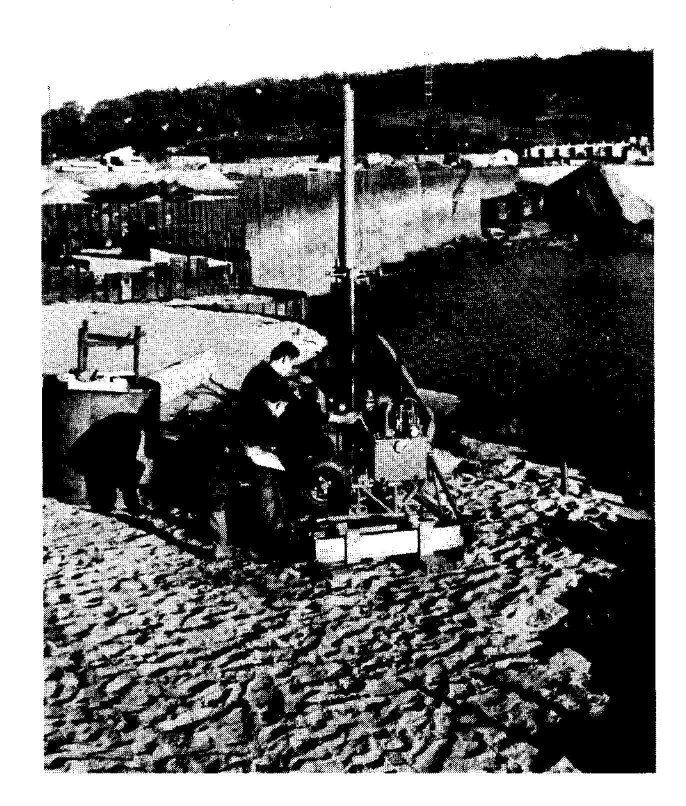


Fig. 1 - Pénétromètre Gouda

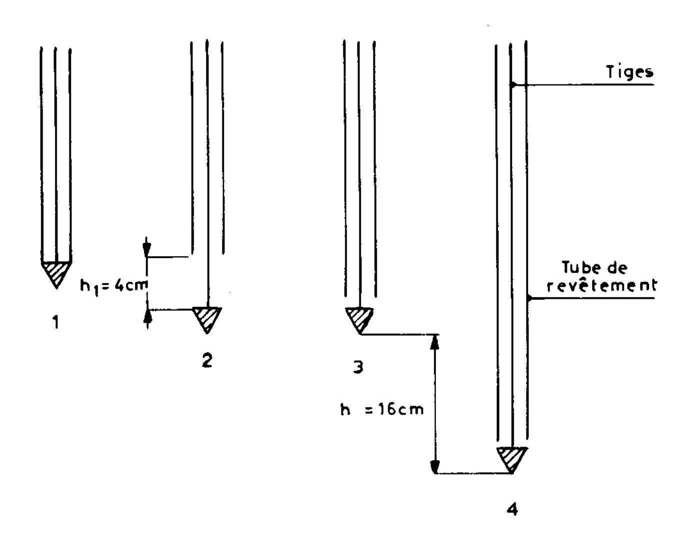


Fig. 2 - Principe du pénétromètre Gouda

L'effort de fonçage est obtenu par un vérin qui agit sur les tiges (ou les tubes) par l'intermédiaire d'une chambre de compression sur laquelle sont branchés deux manomètres de sensibilité différente.

En poussant la pointe seule, on enregistre donc l'effort de pointe qu'il faut corriger du poids des tiges surmontant le cône.

En phase 3, on ramène les tubes au niveau du cône sans effectuer de mesure. Puis — en phase 4 — on pousse l'ensemble tiges-tubes sur une longueur h_2 (généralement de 16 cm), ce qui donne l'effort total d'enfoncement ; d'où l'effort latéral par différence entre les opérations 4 et 2.

La lecture de la résistance en pointe par manomètre est assez peu précise.

Pour la course de $h_1 = 4$ cm, l'aiguille du manomètre peut osciller de façon non négligeable. On convient de prendre comme résultat le maximum de la lecture sur ces quatre centimètres.

Les manomètres utilisés sont en général de 0 - 100 bars et 0 - 600 bars. Dans les argiles molles, des manomètres plus sensibles (0 - 25 ou 0 - 50 bars) ont été utilisés.

La précision de la mesure est de l'ordre de $\pm$ 2 bars dans les argiles molles. C'est pourquoi on sera contraint de comparer des moyennes de résistance en pointe sur un profil (et non pas à comparer entre eux des résultats à un même niveau).

Suivant la nomenclature proposée par M. Parez [1], il s'agit donc d'un appareil à « cône mobile et transmission par barres ».

Pénétromètre Gouda modifié ou pénétromètre électrique

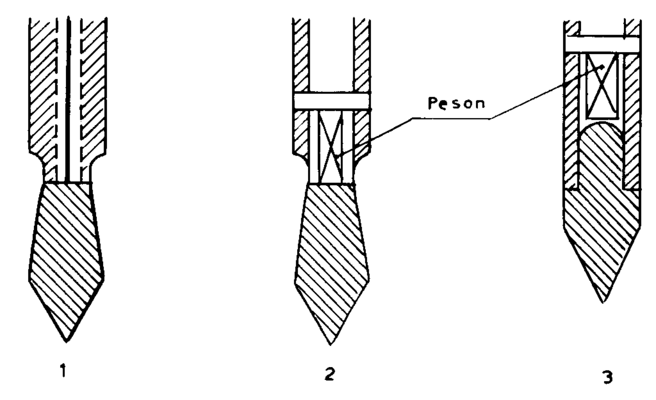
Tout en conservant les qualités propres au pénétromètre Gouda qui sont la robustesse, la relative maniabilité et le rendement élevé, nous avons modifié la technique de mesure en adaptant en pointe un peson à jauges de déformations. Il s'agit d'un pénétromètre à mesure continue. Le pénétromètre Sol-Essais (Parez) très répandu en France, se classe dans la même catégorie, mais la mesure se fait par pression d'huile.

Les deux pénétromètres, Gouda et électrique, ont le même diamètre (Ø 36 mm, soit 10 cm² de section). Un appareil électrique de plus grande section (Ø 60 mm soit 28 cm² environ de section) a été réalisé mais les résultats des essais ne sont pas encore exploités.

Dans certains cas, nous avons expérimenté un appareil composite que nous appellerons « Gouda-électrique » : la pointe Gouda met en butée un peson à jauge (le même d'ailleurs qui sert à l'appareil électrique proprement dit).

On a donc schématiquement trois appareils *(fig. 3)*.

1. L'appareil Gouda classique (à mouvement relatif fût-pointe).



1. Gouda classique, 2. Gouda électrique, 3. Pénétromètre électrique.

Fig. 3 - Schéma des trois pénétromètres.

2. L'appareil Gouda électrique (sans mouvement relatif fût-pointe).

3. Le pénétromètre électrique.

La différence entre 1 et 2 donne l'influence du mouvement de la pointe par rapport au fût.

La différence entre 2 et 3 donne l'influence de la géométrie de la pointe.

De plus, l'influence de la vitesse de fonçage a été étudiée.

L'influence des paramètres ci-dessus étant fonction du terrain, des essais ont été réalisés dans différents sols-types.

RESULTATS PAR SOL-TYPE *

Argile molle

Il s'agit d'argile molle post-glaciaire approximativement à sa limite de liquidité ($W_L = 70$) et de masse volumique γ_d de 0,9 g/cm³.

Les valeurs moyennes sont les suivantes :

		Site de Cran (*fig. 4*) Rp	Site de Redon (*fig. 5*) Rp
1. Electrique lent	1cm/5 s	3,12	3,19
2. Electrique rapide	10 cm/5 s	4,22	4,61
3. Gouda lent	1cm/5 s	6,59	5,84
4. Gouda rapide	10 cm/5 s	7,53	7,34
5. Gouda électrique rapide	10 cm/5 s	5,53	

Dans l'argile, la résistance augmente avec la vitesse, phénomène souvent mis en évidence.

Il semble cependant exister une vitesse critique au-delà de laquelle la résistance en pointe n'augmente plus avec la vitesse. Dans un cas nous avons même trouvé une décroissance de la résistance en pointe lorsque la vitesse dépassait une certaine limite, d'ailleurs très élevée (de l'ordre de 6 à 8 cm/s) par rapport aux vitesses couramment utilisées.

Le pénétromètre Gouda donne une résistance près de deux fois supérieure au pénétromètre électrique. Ce résultat est dû, semble-t-il, environ pour moitié au frottement sur la pointe (frottement à l'arrière de la jupe de la pointe Gouda) et environ pour moitié à l'influence du mouvement alternatif de la pointe par rapport au fût. Dans l'appareil Gouda, il est probable que des cisaillement parasites se manifestent à l'arrière du cône au moment où celui-ci est poussé seul au-devant du fût.

Argile raide.

Les valeurs moyennes notées sur le site sont les suivantes :

		Site de Loutehel (*fig. 6*) Rp
1. Electrique lent	1 cm/5 s	30,60
2. Electrique rapide	10 cm/5 s	24,56
3. Gouda lent	1 cm/5 s	38,91
4. Gouda rapide	10 cm/5 s	39,49

L'influence de la vitesse est moins nette que dans les argiles molles.

Le pénétromètre Gouda donne toujours un résultat supérieur au pénétromètre électrique, mais la différence est moins marquée (30 à 60 % uniquement). Cela tient peut-être à la nature même de l'argile qui reflue moins à l'arrière de la pointe que les argiles molles (hypothèse déjà avancée par Thomas [2]).

Devant la dispersion de nos résultats sur ce site (hétérogénéité probable), on se gardera d'une extrapolation hâtive à toute argile raide.

Silt saturé.

Il s'agit d'un matériau lâche, peu pollué (indice de plasticité $I_p = 12$ à 15, $\gamma \simeq 1{,}8$, $\gamma_d \simeq 1{,}4$).

		Site de Plancoët (*fig. 7*) Rp
1. Electrique lent	1 cm/5 s	4,67
2. Electrique rapide	10 cm/5 s	4,11
3. Gouda lent	1 cm/5 s	9,37
4. Gouda rapide	10 cm/5 s	7,52
5. Gouda électrique rapide	10 cm/5 s	5,87

* La résistance en pointe, en fonction de la profondeur, est indiquée en bars, sur les figures 4 à 9. Les résistances en pointes, données dans le texte, sont les moyennes arithmétiques de l'ensemble des résultats du sondage.

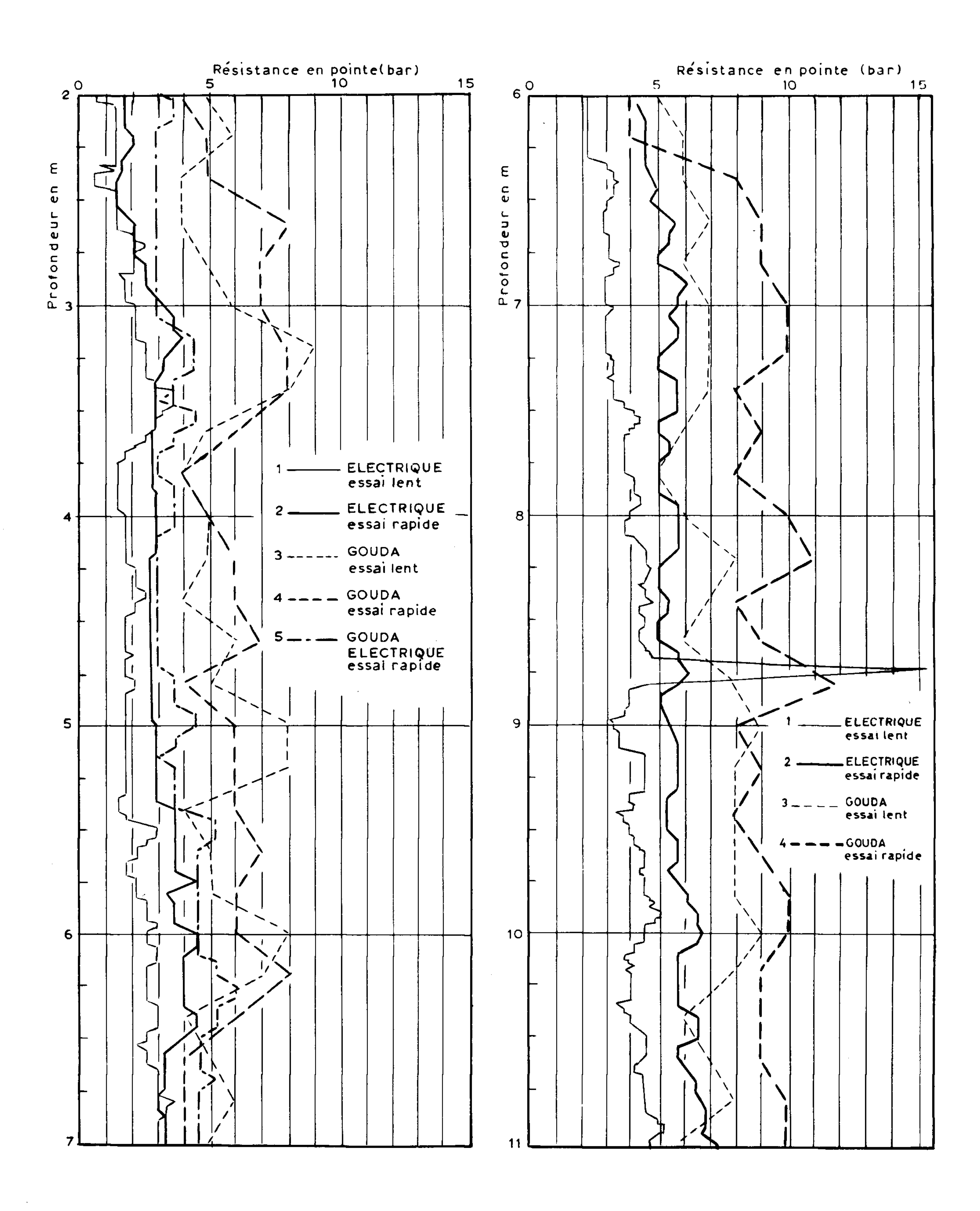


Fig. 4 - Argile molle - Site du Pont de Cran (Morbihan).

Fig. 5 - Argile molle - Redon (Ille-et-Vilaine).

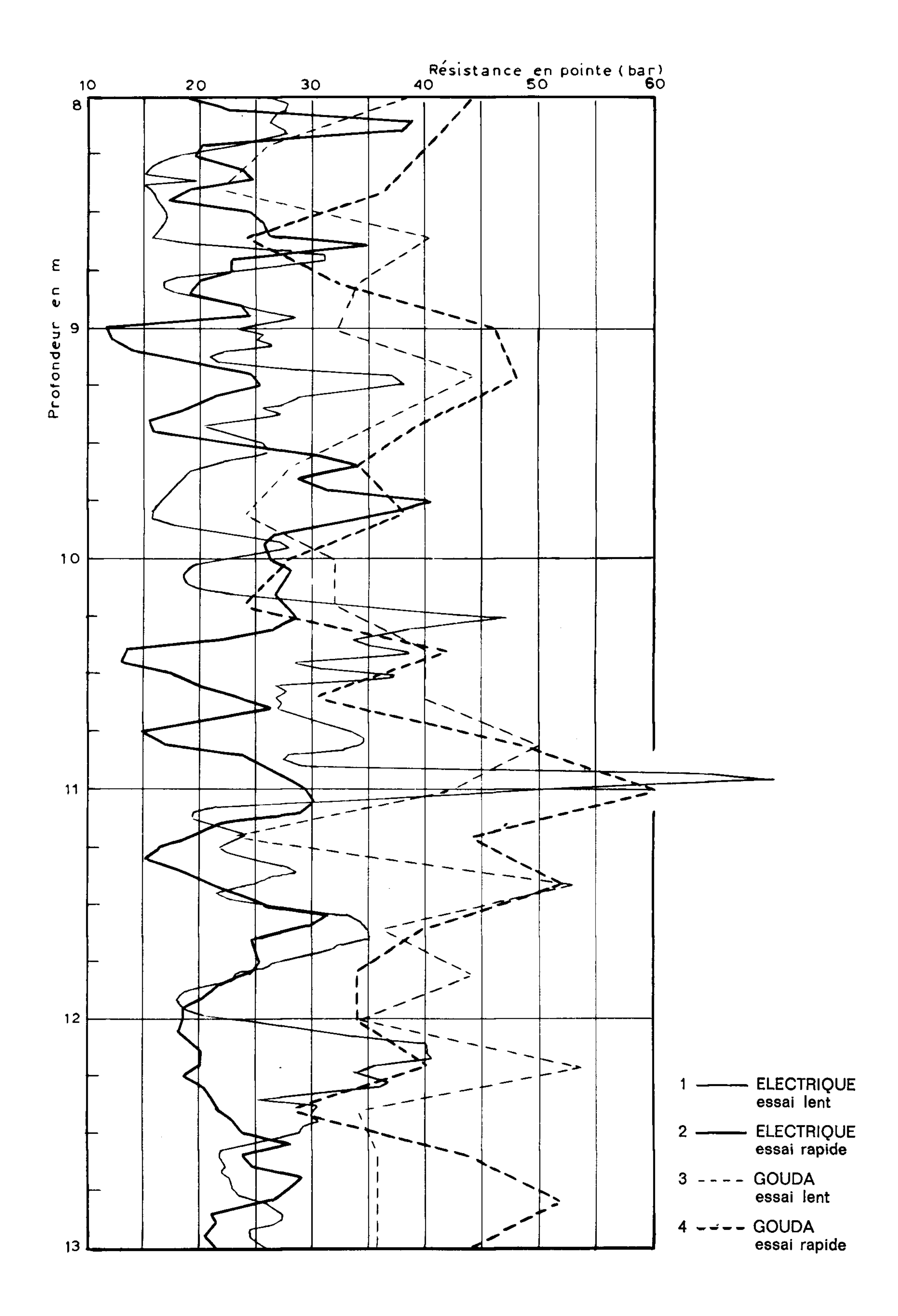


Fig. 6 - Argile raide - Loutehel.

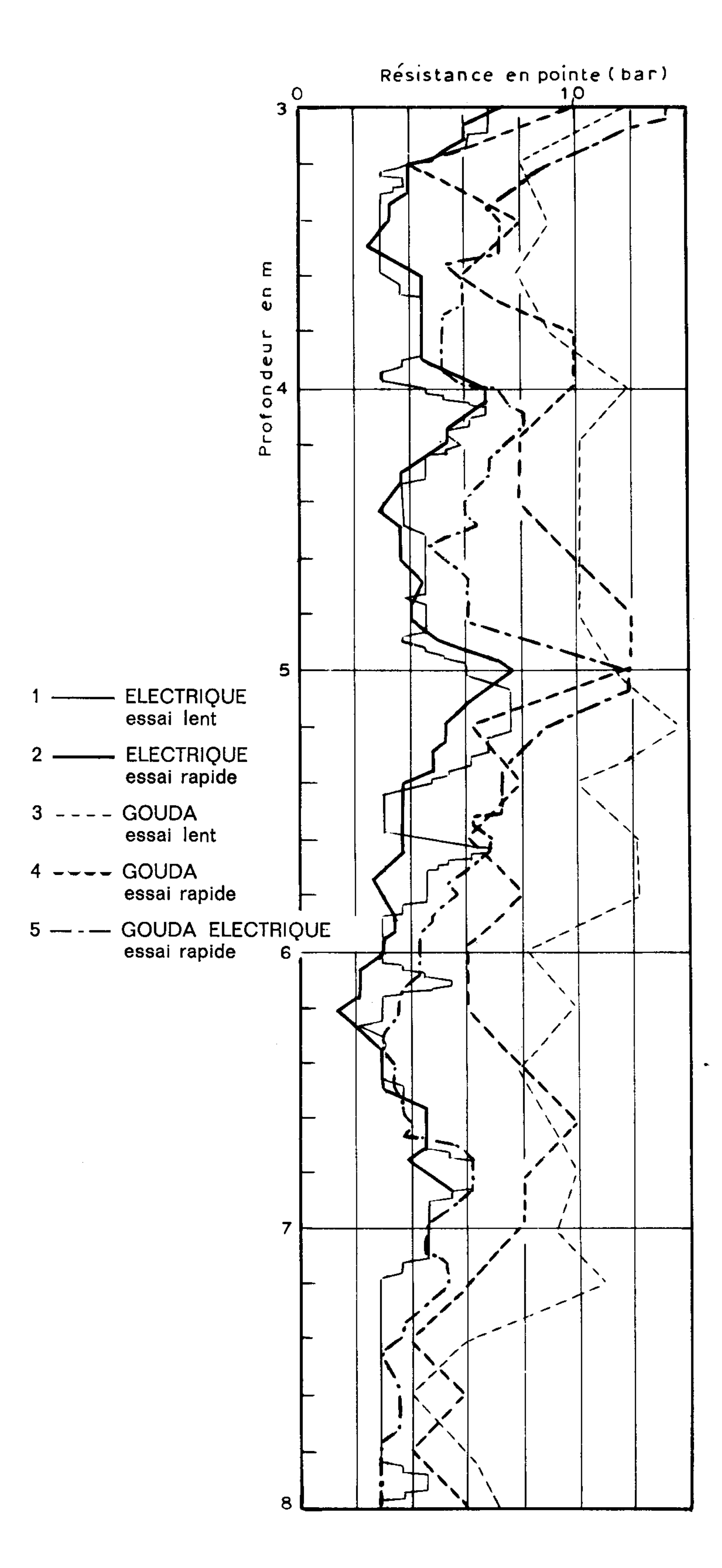


Fig. 7 - Silt saturé - Plancoët (Côtes-du-Nord).

La résistance en pointe semble diminuer avec la vitesse. Ce résultat est assez général dans les sols moyennement perméables et à « dilatance négative ».

Il est possible que dans ces sols une pression interstitielle très importante se manifeste sous la pointe des pénétromètres du fait de l'introduction dans le sol d'un volume étranger et de la diminution de volume du matériau sous l'influence des contraintes de cisaillement.

Les « grains » de silts étant peu adhérents, cette pression interstitielle suffit peut-être à vaincre en grande partie cette faible adhérence. Il existe sans doute une relation de cause à effet entre, d'une part la perméabilité du matériau (liée à la vitesse de dissipation de la pression interstitielle) et d'autre part la vitesse de pénétration du pénétromètre (à laquelle est liée la naissance de cette pression interstitielle) : plus la vitesse est grande et plus la résistance en pointe est faible.

Le pénétromètre Gouda conduit encore à des résistances en pointes supérieures à l'électrique. On peut avancer les mêmes hypothèses que pour les argiles molles. Peut-être également la discontinuité intervient-elle par les arrêts imposés par la technique Gouda : ces arrêts étant suffisants (1 à 2 secondes) pour que la consolidation autour de la pointe se manifeste. Nous avons tenté de vérifier cela en réalisant, au pénétromètre électrique, une pénétration discontinue. Le phénomène n'a pas été mis en évidence, mais la raison en est peut-être le temps de réponse de l'appareil, qui est de l'ordre de 2 à 3 secondes en mouvement alternatif.

Sable peu compact *(fig. 8)*

Il s'agit ici d'un matériau artificiel : un sable propre peu compact du remblai hydraulique du barrage de la Rance (gabion 16). On peut séparer deux cas très différents :

a) *au-dessus de la nappe*

Electrique lent	43,8 bars
Electrique rapide	47,3 bars
Gouda rapide	41,1 bars

b) *au-dessous de la nappe*

Electrique lent	83,5 bars
Electrique rapide	65,6 bars
Gouda rapide	83,2 bars

Il faut tout d'abord noter que les résultats au-dessus de la nappe sont bien groupés. Au-dessous de la nappe il en est différemment et il s'agit d'un hasard si la résistance en pointe de l'électrique lent est égale à celle du Gouda rapide.

Généralement, dans les sols sableux secs, l'écart est faible entre les divers appareils. Cependant l'appareil électrique donne alors presque toujours des résultats supérieurs au Gouda de l'ordre de 10 %.

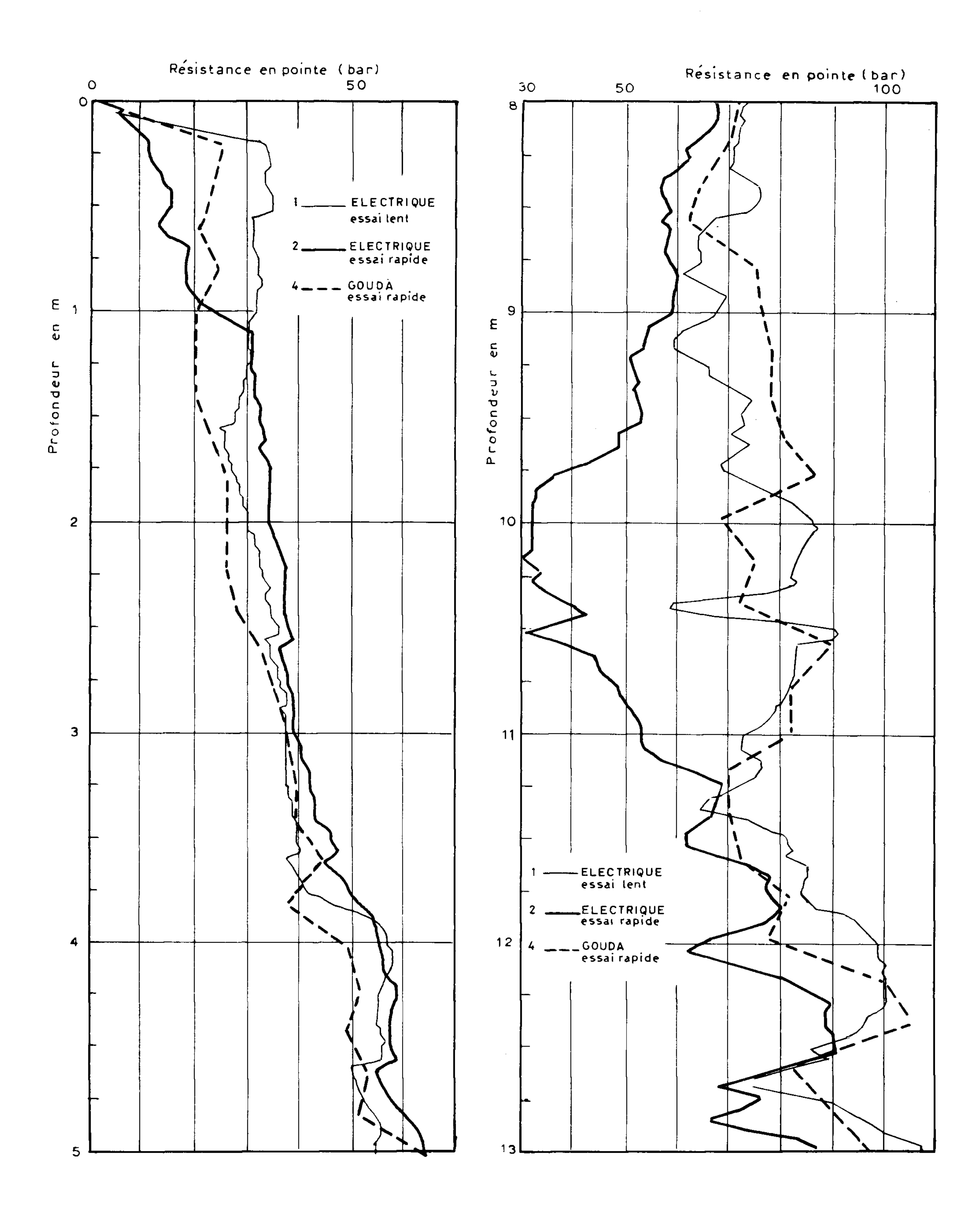


Fig. 8 - Sable fin - Barrage de la Rance (enceinte nord, gabion 16)

Ce fait avait déjà été noté par De Beer et Raedschelders [3], qui l'expliquaient par l'influence du champ de contraintes du fût sur la pointe.

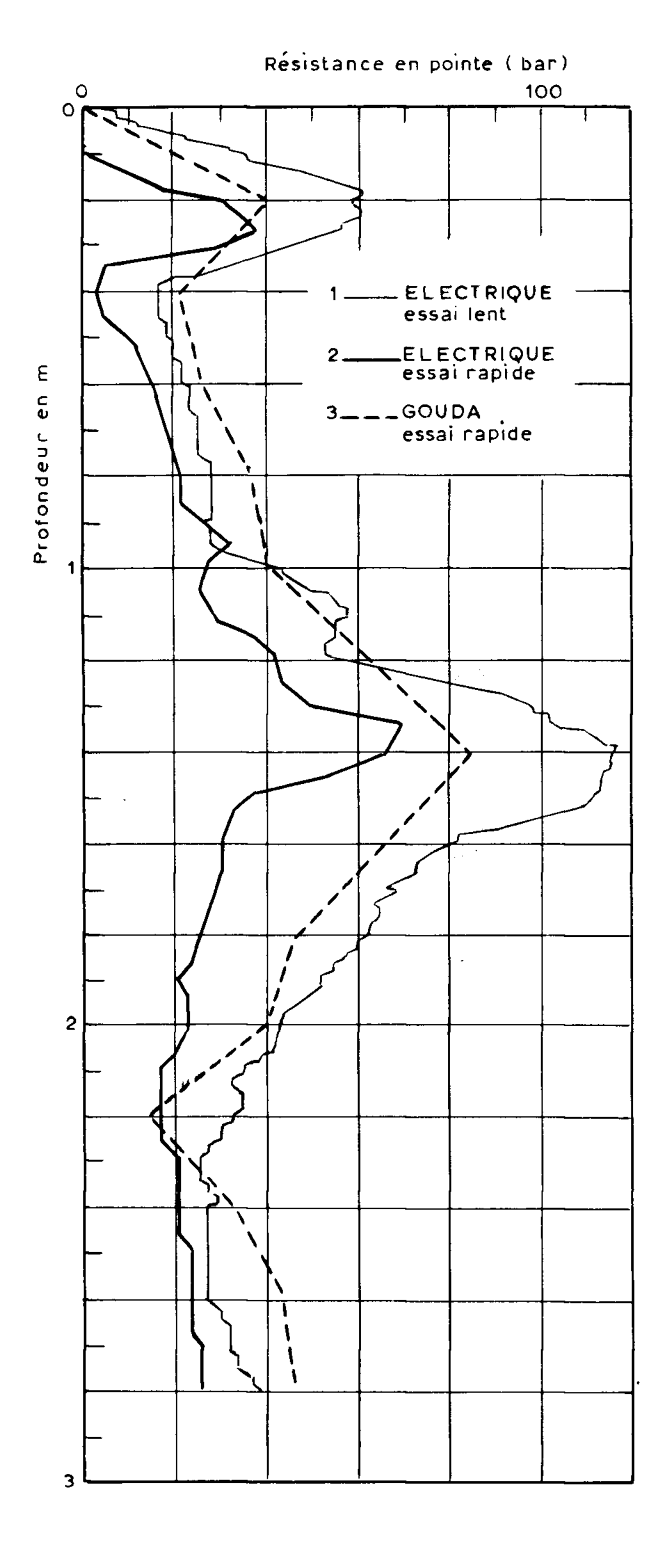


Fig. 9 - Limon des plateaux - Orly.

Dans le sable sec, on ne voit pas en général apparaître d'influence nette de la vitesse.

Il n'en est pas de même sous la nappe où, comme dans les silts, la résistance diminue quand la vitesse augmente. Peut-être peut-on expliquer ce phénomène comme dans le cas de silts saturés par la naissance de pressions interstitielles sous la pointe (faute d'avoir pu prélever d'échantillons intacts sous la nappe dans ces matériaux, nous ne pouvons dire si la dilatance est positive ou négative).

Limon des plateaux *(fig. 9)*

Il s'agit du limon d'Orly, matériau peu compact, à forte teneur en CO_3Ca (15 à 20 %).

Electrique lent	23,2 bars
Electrique rapide	12,4 bars
Gouda rapide	20,8 bars

L'influence de la vitesse est très importante : la résistance en pointe diminue presque de moitié quand la vitesse est multipliée par 10.

Comme il s'agit d'un matériau fragile, on peut supposer que sous une pénétration brutale, les cimentations dues au CO_3Ca sont détruites et que la structure du matériau s'effondre. La résistance en pointe sera donc d'autant plus pessimiste que la vitesse sera plus rapide.

A vitesse égale, l'appareil Gouda conduit à des résultats presque doubles de ceux du pénétromètre électrique.

Comme précédemment, les causes en sont probablement le frottement parasite du sol à l'arrière de la pointe, des cisaillements parasites et les arrêts momentanés nécessités par la méthode.

CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici indiquent que le type de pénétromètre et la vitesse de pénétration ont une influence importante sur la mesure de la résistance en pointe.

Les divergences de lecture semblent dues à la géométrie des pointes utilisées, au mouvement relatif éventuel de la pointe par rapport au fût et à la vitesse de pénétration.

D'autres facteurs, non abordés ici, interviennent aussi, en particulier le diamètre de la pointe.

TABLEAU RECAPITULATIF

Nature du sol	Influence vitesse rapport 10 électrique	Influence vitesse rapport 10 Gouda	Influence nature pénétromètre lent	Influence nature pénétromètre rapide	Influence frottement sur la pointe	Influence mouvement relatif
Argile molle - Cran	1,35	1,14	2,10	1,79	1,31	1,36
Argile molle - Redon	1,45	1,26	1,82	1,59		
Argile raide - Loutehel	0,81	1,01	1,27	1,57		
Silt saturé - Plancoët	0,88	0,81	2,00	1,83	1,42	1,28
Sable peu compact sec Rance gabion 16	1,08			0,87		
Sable peu compact saturé Rance gabion 16	0,78			1,26		
Sable peu compact sec Rance gabion 12	1,08			0,90		
Sable peu compact saturé Rance gabion 12	1,10			1,22		
Limon des plateaux cimenté Orly	0,53			1,67		

Les rapports obtenus au cours de cette étude sommaire ne devraient pas être le prétexte de corrections éventuelles des mesures effectuées au pénétromètre Gouda classique. Nous n'avons étudié que des sols-types et la difficulté du problème provient justement du fait que ces rapports dépendent des sols testés.

Il n'est pas question évidemment de juger tel ou tel type de matériel.

Si du point de vue de la mécanique des sols il est indispensable de réaliser de bonnes mesures, du point de vue pratique, d'autres critères entrent en ligne de compte (surtout pour les essais en place) qui sont la robustesse, la maniabilité, le rendement.

Il faudrait donc considérer deux cas :

ou bien on ne demande au pénétromètre statique qu'une reconnaissance rapide en étude préliminaire ou pour interpolation de caractéristiques mesurées par des méthodes plus évoluées (essais de laboratoire par exemple) ; dans ce cas, on peut utiliser à peu près tout type de pointe et des vitesses de pénétration assez élevées,

ou bien on demande au pénétromètre statique une mesure absolue, dans le but de calculer une fondation sur pieux par exemple, ou d'appliquer des formules empiriques du type $W = \frac{R_p}{K}$ comme taux de travail de semelles en surface, ou encore de tenter de mesurer la cohésion des argiles.

On devra alors à notre avis s'orienter vers des mesures continues à vitesses lentes.

Rédigé en janvier 1968

BIBLIOGRAPHIE

[1] L. PAREZ, *Les pénétromètres et leur utilisation* - Journées des Fondations (6 au 11 mai 1963), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

[2] D. THOMAS, Static penetration tests in London clay, *Geotechnique* n° **2**, 15 (1965), 174-179.

[3] RAEDSCHELDERS (Belgique) - *Intervention orale sur la détermination de la force portante d'une fondation à partir des indications du pénétromètre*, 5e Congrès international de Mécanique des Sols et Travaux de Fondations, Paris 1961, tome **3**, 275-277.

[4] J. KERISEL, *Fondations profondes en milieux sableux*, 5e Congrès international de Mécanique des Sols et Travaux de Fondations, Paris 1961, tome **2**, 73.

[5] W.H. WARD, A. MARSLAND et G. SAMUELS, Properties of the London clay at the Ashford commun shast ; institut and undrained straings tests, *Géotechnique* n° **4**, 15 (1966), 321-344.